基于眼动追踪技术的
乒乓球视觉运动训练效果研究

赵丹宇[1]，林长地[2]，吴正仲[3]
[1,2](福建理工大学体育教研部 福州 350118)
[3](福建理工大学设计学院 福州 350118)

摘要：
[目的] 基于眼动追踪技术创建乒乓球视觉运动训练方法。**[方法]** 采用 C#语言和影视技术开发视觉追踪训练软件，设置实验组和对照组，运用训练软件对实验组大学生进行 15 周的课上 10 分钟专项视觉运动周期性训练。**[结果]** 实验组大学生平均追踪数量比对照组多 2.03 个、追踪正确率高 13%；注视次数比对照组少 40.25 次、注视时间短 15.03s(秒)；行为反应时比对照组短 3.46ms（毫秒）、动作准确率高 22%。**[局限]** 受眼动仪器先进性限制，未能获取到被试在实际乒乓球运动场景下的眼动数据。**[结论]** 研究结果表明实验组大学生对信息加工速度更快，视觉搜索效率更高，运动表现更加出色，基于眼动追踪的视觉训练软件比常规训练手段更直接、有效。
关键词：眼动追踪；视觉训练；乒乓球；运动表现

Research on the effect of visual movement training of table tennis based on eye tracking

Zhao Danyu[1], Lin Zhangdi[2], Wu Zhengzhong[3],
[1,2](Physical Education Department, Fujian University of Science and Technology, Fuzhou 350118)
[3] (School of Design, Fujian University of Science and Technology, Fuzhou 350118)

Abstract:
[Objective] This paper uses **eye tracking technology** to develop **a visual movement training method for table tennis.** **[Methods]** C# language and video technology were used to develop visual tracking training software, the experimental group and the control group were set up, and the training software was applied to the experimental group of college students for 15 weeks in class for 10 minutes visual motor periodic training. **[Results]** The average tracking numbers in the experimental group was 2.03 more than that in the control group, and the tracking accuracy was 13% higher. The fixation times were 40.25 times less and the fixation time was 15.03 s shorter than that in the control group. The behavioral response time was 3.46 ms shorter than that in the control group, and the action accuracy was 22% higher. **[Limitations]** Due to the advanced nature of the eye movement instrument, the eye movement data of the subjects in the actual table tennis movement scene could not be obtained. **[Conclusions]** The results show that the experimental group have faster information processing speed, higher visual search efficiency, and better sports performance.

The visual training software based on eye tracking is more direct and effective than the conventional training means.
Keywords： Eye tracking; Visual training; Table tennis; Sports performance

引言

眼动追踪（Eye Tracking）是指通过追踪个体眼球运动信息，分析眼球的运动轨迹和特征，反映注视过程中个体的注意力分配、信息处理方式以及认知策略的认知活动[1]。通过眼动追踪技术测量得到的眼动指标数据（如注视点、注视时长、眼跳和移动轨迹等数据）可以分析人的注视行为，而注视行为是其注意力的主观分配，在某种程度上能反映大脑的思维活动。随着眼动设备逐渐精密化、便携化，眼动追踪技术在人机交互、军事、交通、建筑、医疗、教育、心理、体育和产品设计等领域的应用越来越广阔，学科交叉程度也逐渐加深。

国内外学者在上世纪六十年代相继将眼动追踪技术应用到体育运动领域中，分析不同水平运动员的眼动特征，探究不同类别的刺激物对运动员眼动指标的影响，研究涉及乒乓球、羽毛球、网球、足球、板球、篮球和排球等多个运动情景。Helsen 等人采用“专家-新手”范式对足球运动员的眼动特征进行了研究，研究发现两组被试在注视时间上未表现出显著性差异，但两组反应时、注视次数和注视位置体现出明显差异。专家组被试足球专项认知能力更强，专家组能更快速地捕捉到关键信息，并能对有效关键信息进行快速加工，进而执行动作反应；专家组被试在运动情景下能够减少了很多无谓的注视次数，说明专家组被试捕捉关键有效信息的能力更强，减少了很多无谓的注视次数；总体表明，具有丰富的运动专项能力专家组被试在运动情境下注视位置更加有效、注视次数更少、反应时更短，说明专家组被试的视觉搜索能力更强[2] 。Ripoll 等对拳击运动员的眼动特征进行了研究，结果表明：专家组被试对关键动作部位注视的时间更长、次数更多，注视方式为反复注视几个部位，而新手组注视方式则是按照一定顺序的注视方式[3]。Michael 等研究了板球击球手的眼动特征，专家型击球手能有更短的时间相对精准的判断出投手所投出球的落地时间和地点，研究结果表明两组被试的视觉搜索策略也不同[4]。孙国晓等研究发现视觉运动追踪在运动技能学习和动作控制中具有重要作用，对运动员视觉运动追踪研究能够帮助其在复杂的情境中快速准确地获取关键有效信息，提高运动表现[5]。解涛等对现实情境下乒乓球运动员相持阶段视觉追踪的优势特征进行研究，发现专家具备高效的视觉追踪能力优势、灵活的眼动注视策略，视觉追踪表现更加优异[6]。李安民等通过对乒乓球运动员和普通大学生在运动情境中的视觉搜索进行研究，发现运动员的反应时和准确性具有明显优势，视觉搜索能力存在时间、空间上的优势[7]。

结合国内外相关研究成果发现，虽然针对不同项目优秀运动员的视觉搜索模式研究取得了一定的成果，但研究大多采用单一的“专家-新手”范式寻找不同水平运动员视觉运动特征与优势，仍然处于证据积累和一般特征描述阶段，特别值得关注的是以往研究绝大部分是探讨优秀运动员的视觉运动模式，对于如何提高一般运动员或新手视觉运动能力的训练方法研究还比较少。

基于此，本研究以视觉信息加工理论为指导，将眼动追踪技术同体育教学进行深度融合，运用现代计算机技术和手段研发视觉追踪训练软件，并对乒乓球课大学生进行视觉追踪周期训练，利用眼动仪分析实验组和对照组视觉运动特征差异，探讨视觉追踪训练对运动决策和运动表现的影响，探索视觉追踪训练软件提

高一般运动员或新手运动能力的效果，以期为优化体育教学训练方法提供技术创新。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为大学二年级乒乓球公共课 30 名男同学，实验组和对照组各随机分配 15 名同学，30 名被试均右手持拍，视力正常，无散光、色盲、色弱，左、右眼视力无明显差异，没有参加过眼动测试。学生自愿参加实验，已知晓实验的所有特点，并签订知情同意书。

组别	年龄/岁	运动等级	训练年限/年	t	p
实验组	*20.82±0.87*	*初级*	*1.57±0.52*	*-0.408*	*0.688*
对照组	*20.97±0.85*	*初级*	*1.56±0.45*	*0.030*	*0.976*

表 1 被试基本信息组间独立样本 t 检验结果

Table 1 Results of T test of basic information between groups

从表 1 可知：实验组和对照组运动等级相同，对于年龄、球龄全部均表现出一致性，并没有显著性差异($p>0.05$)。

1.2 实验仪器

Tobii glasses 2 眼动仪一台、泰德 Y&T V-989G 乒乓球发球机 1 台、Sony FDR-AX60 摄像机 1 部，用于视觉追踪训练的 Dell Inspiron 14R-5421 笔记本电脑一台、用于采集眼动数据的 Ipaid9 平板电脑 1 台，ErgoLAB 分析软件和自主研发的视觉追踪训练软件（v1.0）。视觉追踪训练软件依据眼动追踪理论，采用 C#语言和影视技术，抽象模拟乒乓球运动场景，以真实训练过程中乒乓球的落点设计“W”型飞行线路，乒乓球顺序沿 A⇋B⇋C⇋D⇋E 来回运动，乒乓球上随机显示的数字“1”或“2”呈现时间为 0.5s（秒）。乒乓球从对方触球后飞行至本方台面时间一般为 0.3～0.5s（秒），因软件主要为大学生乒乓球初学者提供视觉运动训练，所以乒乓球飞行速度以 1.2s（秒）、1s（秒）、0.5s（秒）设置“易”、“中”、“难”3 个训练难度，单个难度训练时间为 1min（分钟）。

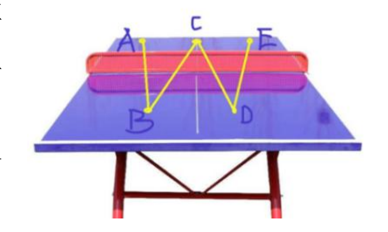


图 1：视觉追踪训练乒乓球飞行线路

1.3 实验方案

自变量为实验组和对照组。因变量为被测试视觉追踪训练软件的大学生行为指标（追踪数量、追踪正确率）、眼动指标（注视次数、注视时间）和正手攻球行为指标（反应时、准确率）。

眼动测试和视觉追踪训练安排在乒乓球教室旁安静、舒适的实验室，为被试者提供张舒适的、平稳的椅子。眼动测试采用视觉神经通道，在视觉场景中经常存在一些与测试无关的物体，它们引起被试者注意，并诱发被试者朝向该类物体的眼动，会降低被试者对心理任务的兴趣，降低了数据的同质性。因此，在测试和训练前排除与眼动测试任务无关的分心物体。1）、清洁电脑屏幕、清除眼动

仪等硬件实验设备表面污点。2）、清理与实验无关的物体，整理电脑周边连接线。3）、保持实验室内、室外安静，排除一切噪声干扰。4）、保持室内良好的光线，避免一切反射光。

在乒乓球课上运用自主研发的“视觉追踪训练软件”对实验组学生进行专项视觉运动训练，训练者以运动员的视角，跟踪电脑屏幕上模拟真实运动场景下按照“W”型运动轨迹来回运动的乒乓球，训练者需快速按下乒乓球上随机显示数字相对应的数字按键 1 或 2，按键正确会自动显示下个数字，系统会自动记录、显示训练追踪数量和正确率，实验组被试采用“易”（2 次） →“中”（2 次）→“难”（1 次）循序渐进的训练难度进行视觉运动训练，次与次训练间歇 1 分钟，每次课视觉训练为时间 9min（分钟），15 次周期训练课后，利用 Tobii 眼动仪和 ErgoLAB 软件收分析实验组与对照组大学生注视次数和注视时间眼动指标和眼动特征，利用 SONY 摄像机记录被试正手攻球动作的反应时间和攻入对方纵向球台右侧 1/3 有效区的动作执行准确性。

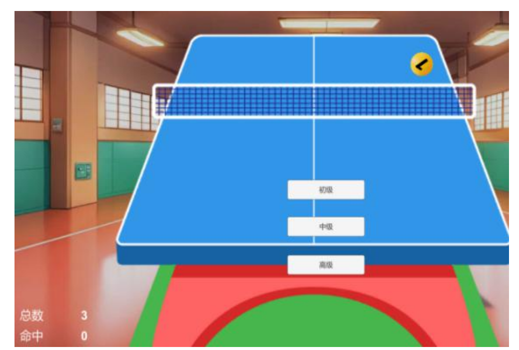


图 2：视觉追踪训练软件训练界面


图 3：正手攻球行为测试

2 实验结果

2.1 视觉追踪训练软件行为数据

训练软件行为数据是指被试使用“视觉追踪训练软件”训练时产生行为数据，软件行为数据包括追踪数量和追踪正确率。追踪数量指单位时间的快速追踪到目标物的总个数；追踪正确率指正确确认追踪到目标物次数与总次数之比，两项数据主要反映被试的专注度、手眼快速协调反应能力和视觉对有效信息在头脑中加工处理后所做出执行动作准确性。

表 2 训练软件行为指标组间的独立样本 t 检验结果

Table 2 Results of independent sample T-test between groups of software behavior indicators

行为数据	实验组	对照组	t	P
追踪数量	*49.92±1.16*	*47.89±1.66*	*3.671*	*0.001*****
追踪正确率%	*87±0.08*	*74±0.16*	*2.393*	*0.023**

注：*表示 P<0.05，**表示 P<0.01，表 3、表 4 同此。

由表 2 可知，实验组平均追踪数量的平均值 49.92 个，明显高于对照组追踪数量的平均值 47.89 个，追踪数量呈现出 0.01 水平显著性(t=3.671，p=0.001)；实验组追踪正确率 87%，明显高于对照组追踪正确率 74%，追踪正确率 0.05 水平显著性(t=2.393，p=0.023)，实验组和对照组被试在追踪数量、正确率均呈现出显著性差异(p<0.05)。

2.2 视觉追踪训练眼动数据

视觉追踪训练眼动数据是指被试使用“视觉追踪训练软件”训练时眼球在追踪运动目标的过程中产生的眼动数据，眼动数据主要包括注视次数和注视时间。注视次数指被试眼睛注视目标物的次数；注视时间指被试眼睛注视目标物的时长。通过追踪被试眼球运动信息来分析被试眼球的运动轨迹和视觉搜索特征，可以充分反映被试注视过程中的注意力主观分配、信息处理方式和认知策略。

表 3 眼动指标组间的独立样本 t 检验结果

Table3 Results of Independent-Sample T Test of Eye Movement

眼动指标	实验组	对照组	t	P
注视次数	*57.50±14.70*	*97.75±40.99*	*-2.614*	*0.020**
注视时间/S	*15.19±6.47*	*30.22±16.02*	*-2.460*	*0.028**

由表 3 可知，实验组注视次数 57.50 个，会明显低于对照组的平均值 97.75 个，对于注视次数呈现出 0.05 水平显著性(t=-2.614，p=0.020)；实验组注视时间 15.15s（秒），会明显低于对照组的注视时间 30.22s，对于注视时间呈现出 0.05 水平显著性(t=-2.460，p=0.028)，实验组和对照组被试在注视次数、注视时间上均呈现出显著性差异(p<0.05)。实验组大学生能用更少的注视次数和更少的注视时间即可获取到所需的视觉信息，而对照组则需要花费更多的时间进行多次的搜索。随着注视时间的缩短，不仅提高了实验组大学生的视觉搜索速度，还能保证运动员有更从充足的时间进行信息加工和搜索更丰富的信息。充分表明两组被试在视觉搜索的效率上存在显著性差异。

2.3 人机对练检验正手攻球行为数据

乒乓球视觉追踪周期性训练后，利用发球机检验视觉追踪训练对被试乒乓球正手攻球技术学习效果的影响。发球机设置固定落点：对方球台左侧 1/3 区；旋转：上旋；速度：7 档。利用摄像机记录和分析视觉专项运动训练后大学生正手攻球行为数据，行为数据包括反应时和准确率。反应时指发球机击打乒乓球落至本方台面时到被试球拍触球时之间的时间；准确率指被试用正手攻球技术成功把来球（50 个）回击到对方球台右侧纵向 1/3 区域内的准确程度，该指标主要考察视觉追踪专项训练对乒乓球初学者运动决策和运动表现的影响。

表 4 正手攻球行为指标组间的独立样本 t 检验结果

Table 4 Results of independent sample T test of forehand attacking behavior index among groups

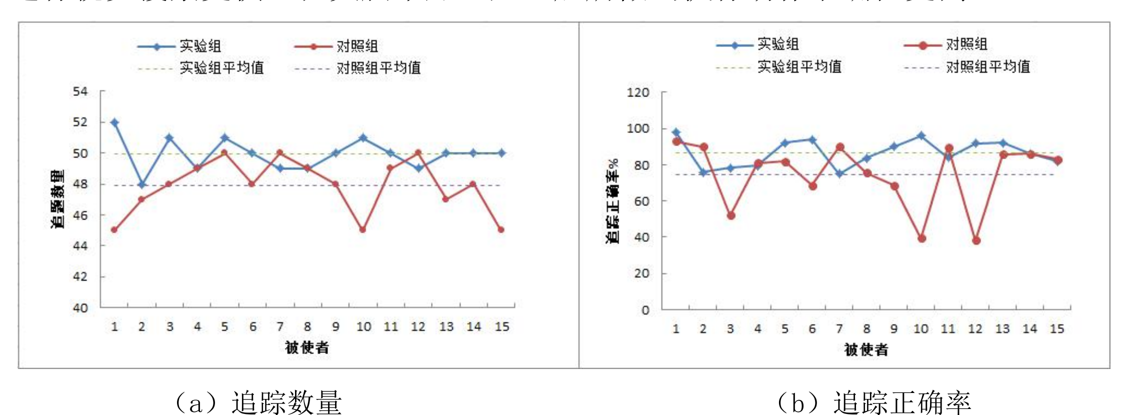
行为数据	实验组	对照组	t	P
反应时/ms	*11.91±1.91*	*15.38±2.61*	*-3.182*	*0.006***
准确率%	*0.83±0.12*	*0.61±0.11*	*3.826*	*0.002***

由表 4 可知，实验组正手攻球反应时平均值 11.91ms，会明显低于对照组正手攻球反应时平均值 15.38 ms，反应时呈现出 0.01 水平显著性(t=-3.182，p=0.006)；实验组正手攻球准确率 83%，明显高于正手攻球准确率 61%，准确率呈现出 0.01 水平显著性(t=3.826，p=0.002)，实验组和对照组被试在反应时、正确率方面均呈现出显著性差异(p<0.05)。

3 分析与讨论

3.1 追踪数量和追踪正确率

乒乓球是一项复杂的高策略隔网对抗运动，随着运动员身体素质的提升、科学训练方法的指导以及乒乓球运动装备的革新，乒乓球比赛中的球以高达 15～30m/s 速度进行飞行，而人在静止状态下注意力高度集中时，从感知到作出判断也需要 0.3～0.5ms（毫秒）。运动员在比赛过程中视觉始终追踪乒乓球运动，形成对乒乓球飞行线路、速度、落点以及旋转的视觉预测，进而进行决策加工，这就要求乒乓运动员必须在高压力的复杂情境下根据已有知识经验和有限的外部信息快速主动进行有效信息选择与加工，并及时执行准确的动作反应。在此过程中，视觉追踪（盯球）自然是运动员快速、准确执行动作的重要基础。由于眼动记录仪是采用角膜反射技术测量注视点，因此研究者认为“看（looking）”不等于“看见（seeing）”，“注视（looking）”不等于“注意（watching）”，单一的用眼动记录技术测得的注视点也许并不是运动员思考与决策时注视的位置[8,9]。训练软件设置追踪正确率，成功克服了有的研究者曾提出眼动记录技术原本具有自身的局限性问题。从图 4 可以看出，实验组大学生平均追踪数量比对照组多 2.03 个、追踪正确率比对照组高 13%，体现了实验组大学生注意力更集中、专注度更高，实验组追踪正确率明显高于对照组，客观反映出实验组对有效信息进行视觉搜索更快，在头脑中加工处理后所做出执行动作准确性更高。



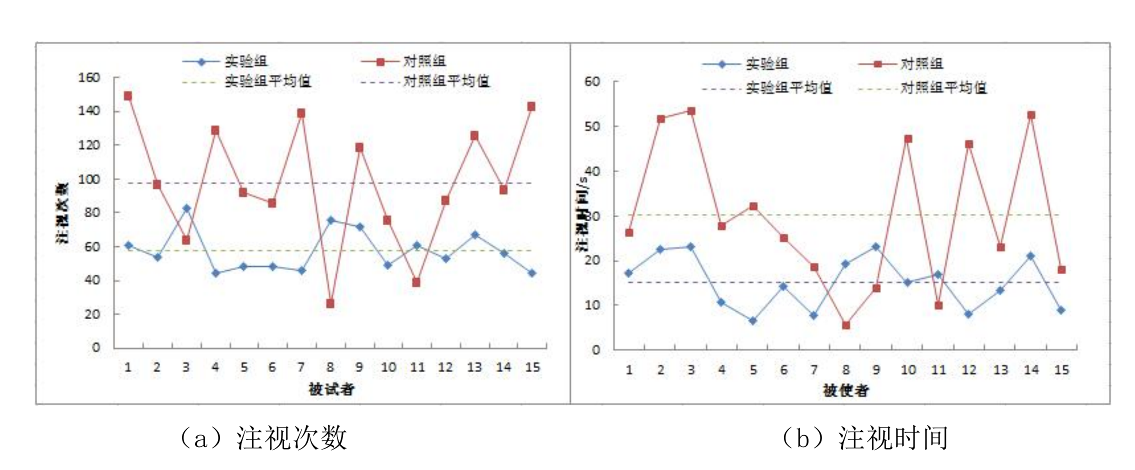
（a）追踪数量　　　　（b）追踪正确率

图 4：实验组与对照组软件追踪行为数据对比

3.2 注视次数和注视时间

人类主要通过视觉感知世界，当注意力集中注视在特定情景或物体的特征上时，我们才能够将这些特征结合到精确感知。注视次数、注视时间是反应被试视觉搜索时间特征重要的眼动指标。注视持续时间是指在注视时视轴中心位置保持不变的持续时间，注视次数较多常常说明在为了完成任务所必须进行的元素组织过程中表现得困惑和不确定[10,11]。注视次数与视景中表征的元素数目有关，与加工深度无关，较大量的注视点表明认知加工难度较大[12]。在一个兴趣区域内的总注视时间越长，表明该区域信息越复杂、难度越高，个体在该区域内捕捉到目标信息所用时间就越长，或将搜索到的信息与内部表征进行匹配时信息加工越困难[13]。注视时间越长，加工的速度就越慢、效率就越低。乒乓球运动员注视时间短于大学生组，说明在观看相同的实验材料时，乒乓球运动员的信息加工速度、效率高，乒乓球运动员拥有跟快的信息加工效率，更优的信息加工质量[7]。从图 5 可以看出，实验组经过视觉追踪训练后的注视次数比对照组少 40.25 次，差异显著，实验组被试在视觉区域内对目标物的认知加工更容易。实验组被试注视时间比对照组短 15.03s（秒），能更快的在视觉区域内获得到有效信息，并对信息进行快速的加工，其信息加工效率更高。以上差异表明新手组大学生的视觉搜索

具有搜索量大而耗时长、从而导致效率低下的特点，而实验组大学生搜索量少而精，耗时短，实验组被试视觉搜索时间特征优于对照组，其视觉搜索效率更加高效。实验组被试高效的视觉搜索特征与训练行为数据相互验证，直接反应出实验组大学生的反应时更快，追踪目标物数量更多，行为正确率更高。此外，实验表明实验组被试注视次数和时间眼动数据更加平均、集中，而对照组眼动数据离散程度较高，对照组被试个体差异性较大。

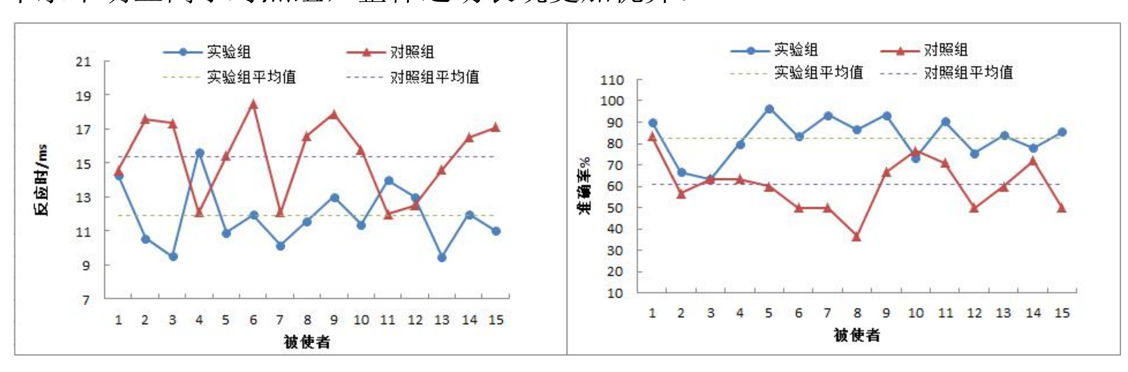


（a）注视次数　　（b）注视时间

图 5：实验组与对照组眼动数据对比

3.3 反应时和准确率

视觉感知是许多活动（包括体育运动）的重要组成部分，运动员在很大程度上依赖于他们的视觉来判断、追踪移动物体，做出快速决策并执行复杂的运动动作。运动员需要良好的快速定位、目标追踪、视觉记忆和空间意识等视觉运动能力。经过 15 周的视觉专项训练，实验组被试的专注度、视觉追踪能力和视觉区域内有效信息的加工速度和质量明显高于对照组。从图 6 可以看出，随着实验组被试视觉运动能力的提升，其正手攻球技术水平明显高于对照组。实验组正手攻球行为反应时对照组快 3.46ms（毫秒）、动作准确率对照组高 22%，实验组的正手攻球的反应时不仅更快，而且准确率也更高，从人机对练现场检验及后期的动作录像可以看出，实验组被试正手攻球动作连贯紧凑，回球的稳定性更高，技术水平明显高于对照组，整体运动表现更加优异。



（a）反应时　　（b）准确率

图 6：实验组与对照组正手攻球行为数据对比

4 结论

利用自主研发的“视觉追踪训练软件 V1.0”对乒乓球公选课大学生进行视觉追踪训练，分析对比视觉专项周期性训练后实验组和对照组各 15 名大学生的眼动特征和运动表现，得到如下结论：

（1）实验组大学生平均追踪数量比对照组多 2.03 个、追踪正确率比对照组高 13%，表明视觉追踪训练能够有效的提高了大学生专注度和快速手眼协调能力，提升大学生乒乓球初学者在复杂运动情景中视觉追踪的反应时、准确性和稳定性。

（2）实验组大学生对目标物注视次数比对照组少 40.25 次、注视时间比对照组短 15.03s（秒），对信息加工速度更快、效率更高，说明视觉追踪训练能帮助训练者提高了视觉搜索能力，提升训练者信息加工水平。

（3）实验组大学生乒乓球正手攻球反应时对照组短 3.46ms（毫秒）、动作准确率对照组高 22%，击球节奏更紧凑连贯、稳定性更高，运动表现更加出色，体现了“视觉追踪训练软件”作为提高乒乓球运动技能和运动决策能力的训练手段，比常规的训练手段更直接、有效。

参考文献：

[1]TANG S,REILLY R,VORSTIUS C. EyeMap: A software system for visualizing and analyzing eye movement data in reading[J] . Behavior Research Methods,2012,44(2) :420-438.

[2]Helsen W, Pauwels J A Cognitive approach Skilled Performance and Perception in Sport[M].Perception and Cognitive:Advances in Eye Movement Research. North Holland:Elsevier Science Publishers,1993:127--139.

[3]Ripoll H, Kerlirzin Y, Stern J F, Reine B. Decision Making and Visual Strategies of Boxers in a Simulated Problem Solving Situation[M]. Perception and cognition: Advances in Eye Movement Research. North Holland: Elsevier Science Publishers,1993: 114--147.

[4]Michael F L, Peter M. From Eye Movement Action: How Batsmen Hit the Ball[J]. Nature Neuroscience,2000（12）：1340--1345.

[5]孙国晓,张力为,Mark R.Wilson.运动目标的视觉追踪:静眼研究进展与前瞻. [J] 成都体育学院学报,2018,44(06) .

[6]解涛,赵洪朋.现实情境下乒乓球运动员相持阶段视觉追踪的优势特征研究.第十二届全国体育科学大会会议论文,2022.

[7]李安民,李晓娜.乒乓球运动员发去落点判断过程中视觉搜索的眼动特征[J].上海体育学院学报 2011,35(2) .

[8]漆昌柱.羽毛球专家—新手在模拟比赛情景中的问题表征与运动思维特征[D].北京体育大学博士学位论文,2001.

[9]漆昌柱.运动员高级认知过程研究的方法范式探析[J].武汉体育学院学报,2004,(6): 160-163.

[10]郑束蕾.个性化地图的认知机理研究[D].解放军信息工程大学,2015.

[11]张艳辉.基于驾驶员视觉负荷的隧道进口线形安全性研究[D].西南交通大学,2012.

[12]王文静.不同水平网球运动员在落点判断过程中的眼动特征研究[D].西安体育学院,2012.

[13]赵亮,刘浩学.农村公路复杂环境中新老驾驶人视觉特性研究[J].中国安全科学学报,2016,(09):30-34.